4C

УДК 621.396

И.И. Сальников
Пензенская государственная технологическая академия, г. Пенза, Россия
Россия, 440605, г. Пенза, пр. Байдукова /ул. Гагарина, 1а / 11, iis@pgta.ru

Формирование изображения нарушителя в радиолучевых системах охраны

I.I. Salnikov
Penza State Technological Academy, c. Penza, Russia
Russia, 440039, Penza, pr. Baidukova / ul. Gagarina, 1a/11, iis@pgta.ru

Forming of the Intruder's Image in Radio Beam Protection Systems

І.І. Сальніков
Пензенська державна технологічна академія, м. Пенза, Росія
440039, Росія, м. Пенза, вул. Байдукова / вул. Гагаріна, 1а/11, iis@pgta.ru

Формування зображення порушника в радіопроменевих системах охорони

В статье рассмотрены вопросы улучшения информационных характеристик двухпозиционных радиолучевых технических систем охраны. В качестве первого приближения сигналообразования использована лучевая модель формирования интерференционной картины ЭМ-волны. Разработан метод формирования двумерного изображения нарушителя в виде теневого силуэта. Получено обратное преобразование Кирхгофа, связывающее функцию пропускания объекта с распределением комплексной амплитуды ЭМ-волны в плоскости приема.
Ключевые слова: радиоизображение, технические системы охраны, интеграл Кирхгофа, обнаружение, функция пропускания.

The article deals with the issues of improving information characteristics of two-position radio-beam technical protection systems. The beam model of forming EM wav interference pattern is used as the first approximation of signal forming. The method of forming the intruder's two-dimensional image as a shadow silhouette has been developed. The author has drawn the Kirchhoff inversion connecting the object's transmission function with the distribution of the EM wave complex amplitude in the reception plane.
Key words: radio image, technical protection system, Kirchhoff integral, detection, transmission function.

У статті розглянуті питання поліпшення інформаційних характеристик двопозиційних радіопроменевих технічних систем охорони. Як перше наближення сигналостворення використана променева модель формування інтерференційної картини ЕМ-хвилі. Розроблено метод формування двовимірного зображення порушника у вигляді тіньового силуету. Отримано зворотне перетворення Кірхгофа, що зв'язує функцію пропускання об'єкта з розподілом комплексної амплітуди ЕМ-хвилі в площині прийому.
Ключові слова: радіозображення, технічні системи охорони, інтеграл Кірхгофа, виявлення, функція пропускання.

Введение

Широкое распространение в технических системах охраны (ТСО) получили радиолучевые (РЛ) ТСО, которые имеют ряд достоинств: слабое влияние погодных условий; стабильность характеристик, так как зондирующий сигнал формируется в самой РЛТСО; скрытность установки.

Особенностью работы современных РЛТСО является использование **порогового обнаружения**, когда решение о наличии нарушителя (Н) в охраняемой зоне (ОЗ) принимается на основе превышения значения принимаемого сигнала некоторого порогового уровня. Подобный метод обнаружения чрезвычайно прост и поэтому получил широкое распространение. Но пороговое обнаружение обладает рядом недостатков, основные из которых заключаются в появлении пропусков и ложной тревоги вследствие наличия шумов и помех. Ложное срабатывание РЛТСО возможно также под воздействием животных, птиц, качающихся деревьев. Для уменьшения ложных тревог в РЛТСО требуется **распознать, классифицировать** Н, что возможно сделать, применив дополнительную обработку, выявляя пространственную границу Н, то есть формируя в РЛТСО **радиоизображение**.

Основой РЛТСО являются однопозиционные и двухпозиционные системы, каждая из которых имеет свои достоинства и недостатки. Разработка методов формирования радиоизображения в таких системах должна существенно улучшить их тактико-технические характеристики [1].

Двухпозиционная РЛТСО состоит из радиопередатчика (ПРД) и радиоприемника (ПРМ), размещаемых на противоположных сторонах охраняемой зоны (ОЗ) (рис. 1). На вход ПРМ попадают парциальные ЭМ-волны, прошедшие различные пути в зоне охраны, включая отраженные от земли. Преодолевая ОЗ, Н вносит возмущение в парциальные ЭМ-волны, при этом основой взаимодействия объекта и ЭМ-волн является **дифракция.** При этом Н перекрывает путь распространения ЭМ-волны, формируя в точке приемника область «тени». По изменениям принимаемого временного сигнала судят о появлении Н в ОЗ.

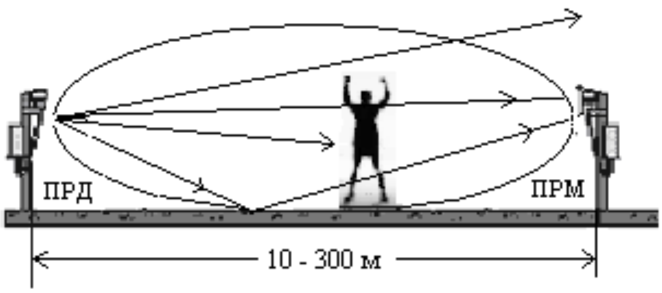


Рисунок 1 – Дифракция ЭМ-волн на нарушителе в двухпозиционной РЛТСО

Целью данной работы является улучшение информационных характеристик двухпозиционных радиолучевых технических систем охраны на основе методов формирования изображения нарушителя в ЭМ-волнах с использованием скалярной теории дифракции Кирхгофа.

Лучевая модель интерференционной картины ЭМ-волн

На рис. 2 представлены основные положения лучевой модели формирования интерференционной картины ЭМ-волн для двухпозиционных РЛТСО. На расстоянии R_m от ПРД расположена антенна ПРМ, в точке расположения которой наблюдается суммирование как отраженных от земной поверхности ЭМ-волн, так и прямой волны. Если учесть влияние погодных условий на коэффициент отражения от земли, а также влияние рельефа местности, то становится очевидной **невозможность** точного вычисления фазы суммарной волны в точке приема. В этой ситуации приходится использовать относительные методы, когда определяется изменение фазы суммарной ЭМ-волны при появлении нарушителя на расстоянии $R_{\text{Н}}$ по отношению к случаю отсутствия нарушителя.

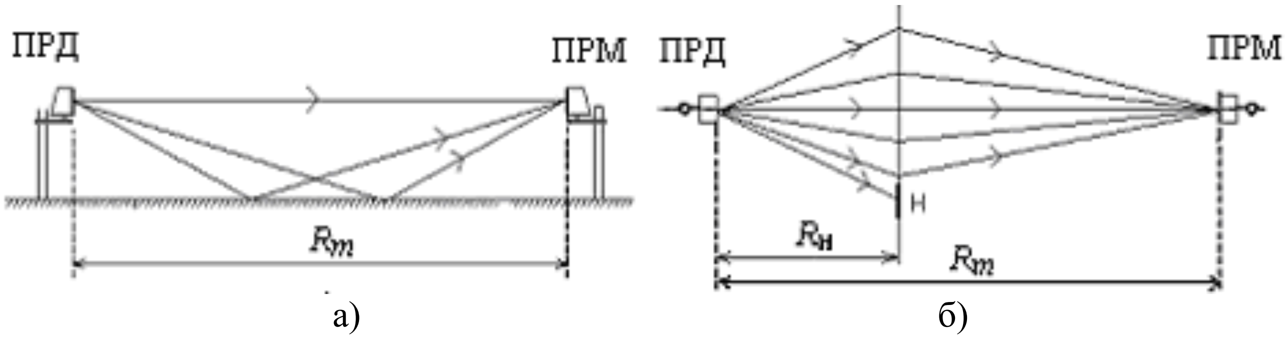


Рисунок 2 – Лучевая модель формирования интерференции
с перекрытием лучей для вертикальной (а) и горизонтальной (б) плоскостей

В отсутствие Н в точке ПРМ устанавливается суммарная волна с квазистационарным (на короткие интервалы времени) состоянием начальной фазы:

$$\dot{E}_{\text{ПРМ}} = \sum_i \dot{E}_i e^{j\varphi_i} = \dot{E}_\Sigma \psi(\Delta\varphi) e^{j\varphi_\Sigma} = \dot{E}\cos(\Delta\varphi) e^{j\varphi}, \qquad (1)$$

где $\dot{E}e^{j\varphi}$ – комплексная амплитуда ЭМ-волны, $\psi(\Delta\varphi)$ – интерференционный множитель, зависящий от относительного фазового сдвига $\Delta\varphi$ плоских волн.

На рис. 3 представлен общий вид высокочастотного сигнала, наблюдаемого на выходе линейной части ПРМ для случая флюктуирующей пучности ЭМ-волны (а) и для случая флюктуирующего узла (б), когда будет наблюдаться полная взаимная компенсация плоских волн.

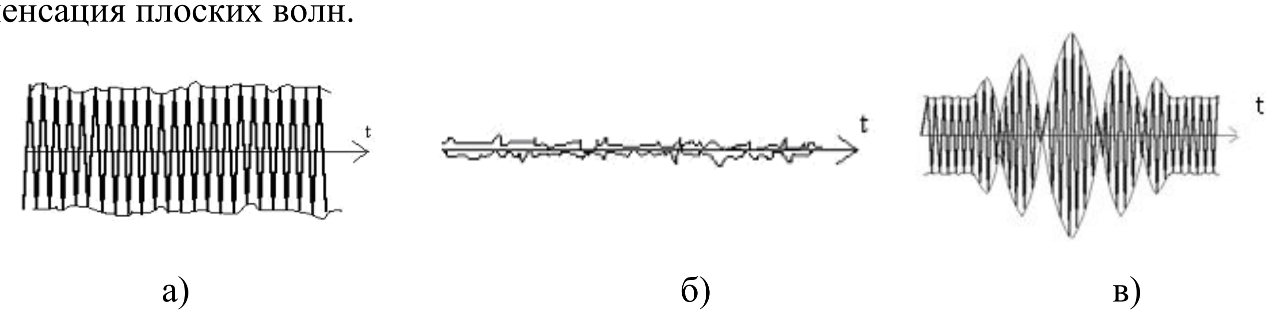


Рисунок 3 – Интерференционная картина для временного сигнала
на выходе ПРМ: а) в пучности; б) в узле; в) при движении Н

При пересечении Н ОЗ будет наблюдаться последовательное перекрытие лучей – плоских волн, которые будут вычитаться из суммарной волны. На рис. 3 в) показано изменение во времени огибающей высокочастотного сигнала при последовательном перекрытии плоских волн в ОЗ при движении Н. На рис. 4 представлена схема для определения разности хода для направления, проходящего через точку на оси $0x_{\text{Н}}$, где находится Н, до точки наблюдения x_R на оси $0x_R$, где расположен ПРМ [1].

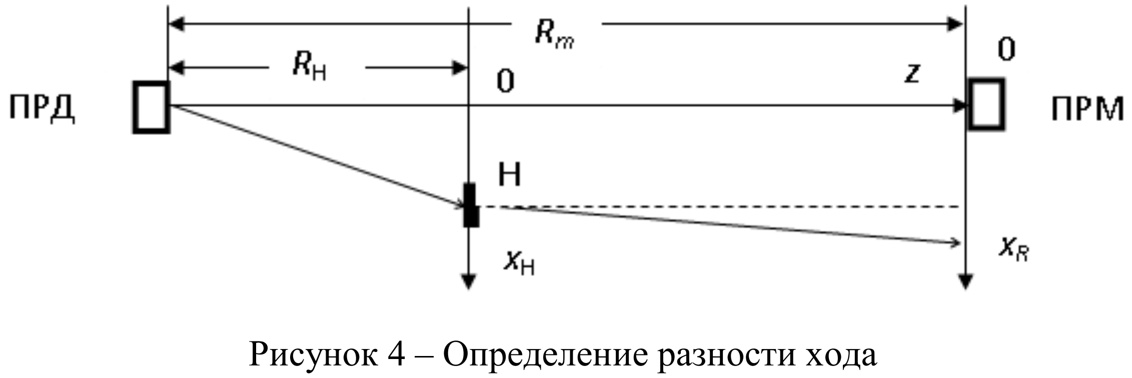


Рисунок 4 – Определение разности хода

Из результата определения разности хода следует выражение для интерференционного множителя, входящего в (1):

$$\psi(x_R)=\cos\left[\frac{\pi}{\lambda}\left(\frac{x_{\text{Н}}^2}{R_{\text{Н}}}+\frac{(x_R-x_{\text{Н}})^2}{(R_m-R_{\text{Н}})}\right)\right]. \qquad (2)$$

Для фиксированного положения Н, то есть когда $x_{\text{Н}}=const$, аргумент косинуса в (2) будет изменяться **по квадратичному закону**. В реальных РЛТСО используется длина волны излучения $\lambda = 1\div3$ см, то есть $\Delta R_{\text{Н}} >> \lambda$, поэтому для двухпозиционных РЛТСО в структуре принимаемого сигнала появляется яркий минимум, характеризующий область **тени**, когда Н оказывается на оси ОЗ, то есть при $x_{\text{Н}} \to 0$.

Дифракция ЭМ-волн на Н существенно искажает область тени в плоскости ПРМ. При получении аналитического выражения для $\psi(\Delta\varphi)$ из выражения (2) необходимо вычесть функцию, описывающую тень при распространении ЭМ-волн через препятствие в виде прямоугольника. Такой функцией служит функция вида $(\sin\alpha)/\alpha$. Это связано с тем, что при дифракции ЭМ-волн на прямоугольном отверстии в дальней зоне используется приближение Фраунгофера, при котором модуль комплексной амплитуды ЭМ-волны описывается двумерным преобразованием Фурье. Тогда получим:

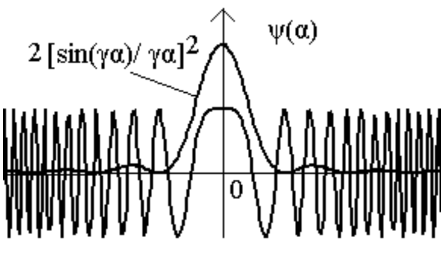
$$\psi(\alpha)=\cos(\alpha^2)-2A_R\left[\frac{\sin(\gamma\alpha)}{\gamma\alpha}\right]^2+1, \qquad (3)$$

где α*, рад* – аргумент функции (2); *γ* – масштабный коэффициент, учитывающий связь аргументов в слагаемых; 1 – прибавляется, чтобы сместить интерференционный множитель для учета наличия прямой волны; $A_R = 1$ *рад*, коэффициент, учитывающий размерность. На рис. 5 представлен график зависимости (3), на котором учтено:

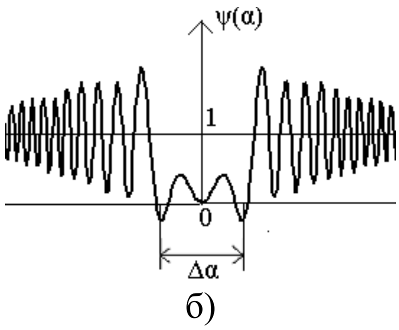
– осциллирующий характер амплитуды при квадратичном изменении фазы, то есть линейное изменение частоты $\psi(z)$, в соответствии с (2);

– наличие тени, когда амплитуда уменьшается, так как Н перекрывает прямое направление ПРД → ПРМ;

– колоколообразное общее изменение амплитуды интерференционной ЭМ-волны за счет влияния диаграммы направленности антенн ПРД и ПРМ.



а)



б)

Рисунок 5 – Формирование интерференционного множителя ЭМ-волны: а) составляющие; б) с учетом тени от Н

Ширина тени по оси $0x_R$ в плоскости ПРМ будет равна:

$$\Delta x_R=2\sqrt{\left(\frac{\lambda}{2}-\frac{\Delta x_{\text{Н}}^2}{4R_{\text{Н}}}\right)\cdot\left(R_m-R_{\text{Н}}\right)}+\Delta x_{\text{Н}}. \qquad (4)$$

Если учитывать движение Н в ОЗ, то можно заменить пространственный анализ ЭМ-волн точечным, то есть использовать временной анализ принимаемого ПРМ сигнала, который требует всего лишь одного ПРМ. При этом, если Н будет двигаться со скоростью $V_{\text{Н}}$ перпендикулярно оси ОЗ, то можно получить выражение для интерференционного множителя с учетом наличия тени для положения ПРМ $x_R = 0$:

$$\psi(t) = \cos\left[gt^2\right] - 2A_R\left[\frac{\sin\left(gt\sqrt{\pi/2}\right)}{gt\sqrt{\pi/2}}\right]^2 + 1, \qquad (5)$$

где A_R *,рад* – коэффициент, учитывающий размерность; $g = \dfrac{\pi R_m V_{\text{Н}}^2}{\lambda R_{\text{Н}}(R_m - R_{\text{Н}})}$.

То есть форма изменения интерференционного множителя во времени соответствует форме изменения в пространстве по закону косинуса с **квадратичным** изменением фазы и наличием провала, характеризующего тень от Н. График изменения во времени интерференционного множителя (5) будет соответствовать рис. 5 б).

Рассмотренная модель сигналообразования в РЛТСО позволяет улучшить отношение сигнал-шум путем применения согласованной фильтрации, определить число нарушителей и по ширине тени измерить дальность до нарушителя. Для получения изображения нарушителя необходимо определить интегральное преобразование от пространственного распределения комплексной амплитуды ЭМ-волны в плоскости ПРМ.

Дифракция ЭМ-волн на человеке-нарушителе

В работе прежде, чем определить вид преобразования, формирующего двумерную функцию пропускания объекта, было получено прямое преобразование, формирующее картину дифракции на объекте в плоскости расположения ПРМ. Для определения комплексной амплитуды ЭМ-волн в плоскости ПРМ двухпозиционной РЛТСО при нахождении в охраняемой зоне Н был использован интеграл Кирхгофа [2]:

$$\dot{E}(P) = -\frac{jA}{2\lambda}\iint_L \frac{\beta_{\text{пр}}(x,y)\exp[j\kappa(r+s)]}{rs}[\cos(\vec{n},\vec{r}) - \cos(\vec{n},\vec{s})]d\sigma, \qquad (6)$$

где интегрирование ведется по контуру L (рис. 6); $d\sigma$ – элемент контура L; $\vec{r}$ – радиус-вектор, проведенный из точки (P_0) нахождения антенны ПРД РЛТСО в точку $Q(x,y,z)$ поверхности нарушителя, причем $\vec{r} = x\vec{i} + (y-h)\vec{j} + z\vec{k}$, где $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – орты, единичные векторы декартовой системы координат, а h – высота размещения антенн ПРД и ПРМ; $\vec{s}$ – вектор, направленный от антенны ПРМ в точку Q поверхности нарушителя:

$$\vec{s} = \vec{r} - \vec{R}_m = x\vec{i} + (y-h)\vec{j} + (z-R_m)\vec{k}, \qquad (7)$$

где $\vec{R}_m = R_m\vec{k}$ – вектор, направленный от антенны ПРД к антенне ПРМ; r и s – модули векторов $\vec{r}$ и $\vec{s}$; $\beta_{\text{пр}}(x,y)$ – функция пропускания Н; $\cos(\vec{n},\vec{r})$ и $\cos(\vec{n},\vec{s})$ – направляющие косинусы углов между вектором $\vec{n}$, нормальному к поверхности нарушителя в точке Q и векторами $\vec{r}$ и $\vec{s}$ соответственно, $\kappa = 2\pi/\lambda$ – волновое число. Отметим, что скалярная теория дифракции является универсальным и наиболее эффективным методом расчета ЭМ-поля [2], используемым при решении ряда задач.

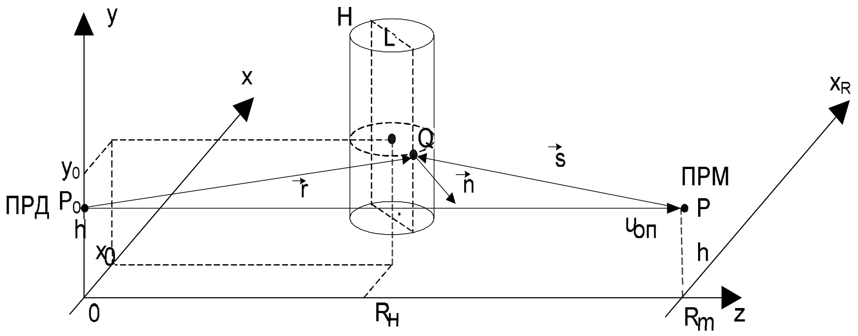


Рисунок 6 – Дифракция ЭМ-волн на Н в двухпозиционной РЛТСО

Достаточно хорошее приближение к реальным формам нарушителя, пересекающего в вертикальном положении охраняемую зону РЛТСО, дают уравнения, описывающие **эллиптический цилиндр.** Показано, что дифракция на объемном теле эквивалентна дифракции на **теневом контуре**. То есть нет необходимости рассматривать все точки поверхности объекта, а достаточно рассмотреть точки теневого контура, ограниченного касательными к эллипсу, из точки ПРД. В работе было получено выражение на основе интеграла Кирхгофа, описывающее дифракционную $\dot{E}(P)$ составляющую комплексной амплитуды ЭМ-волны дополнительного к Н экрана, то есть для случая «прозрачного» Н в виде отверстия в экране.

$$\dot{E}_{дОтв}(P) = -\frac{jA}{2\lambda}\int\limits_{y_0-b}^{y_0+b}\int\limits_{x_L}^{x_K}\beta_{пр}(x,y)\exp(jk(r_{пр}+s_{пр}))\left[\frac{b_{пр}}{r_{пр}^2 s_{пр}}-\frac{b_{пр}-R_m}{r_{пр}s_{пр}^2}\right]dxdy\,, \qquad (8)$$

где $\beta_{пр}(x,y) \approx 1$ – функция пропускания этого экрана. В соответствии с **принципом Бабине** ввиду того, что отверстия в дополнительных экранах полностью «открывают» весь волновой фронт, можно записать:

$$\dot{E}_{дОтв}(P) + \dot{E}_{дЭкр}(P) = \dot{E}_{оп}(R_m)\,, \qquad (9)$$

где $\dot{E}_{дОтв}(P)$ – комплексная амплитуда ЭМ-волны от дополнительного экрана в виде отверстия; $\dot{E}_{дЭкр}(P)$ – в виде непрозрачного экрана. Входящая в выражение (9) величина $\dot{E}_{оп}(R_m) = Ae^{jkR_m}/R_m$ является комплексной амплитудой **прямой** сферической волны, приходящей от антенны ПРД в точку P и выполняющей роль опорной. Таким образом, в соответствии с выражением (9), искомая комплексная амплитуда ЭМ-волны, создаваемая в точке P при наличии между ПРД и ПРМ Н, будет равна:

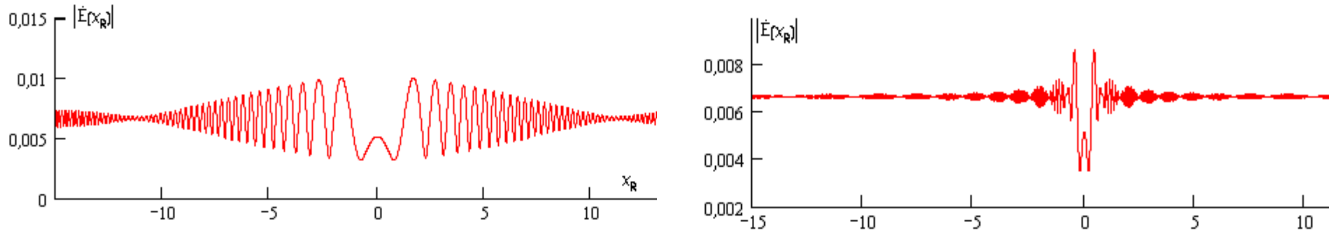
$$\dot{E}_{дЭкр}(P) = \dot{E}_{оп}(R_m) - \dot{E}_{дОтв}(P)\,. \qquad (10)$$

Наличие прямой волны $\dot{E}_{оп}(P)$ и дифрагированной на Н волны $\dot{E}_{дОтв}(P)$ в плоскости нахождения ПРМ на расстоянии R_m от ПРД приводит к интерференции суммарной ЭМ-волны, в результате которой фазовые сдвиги дифрагированных на Н волн превращаются в амплитудную модуляцию по пространству комплексной амплитуды результирующей ЭМ-волны в плоскости ПРМ.

Анализ результата дифракции ЭМ-волны

На рис. 7 приведены результаты расчетов с использованием (9) и (10) в программной среде *Mathcad* значений модуля комплексной амплитуды $\left|\dot{E}_{дЭкр}(P)\right| = \left|\dot{E}(x_R)\right|$ по оси 0x при $R = R_m$, находящихся на расстояниях $R_н$ = 10м (а) и $R_н$ = 140 м (б) при сле-

дующих значениях параметров эллиптического цилиндра: a = 0,25 м, c = 0,3 м, b = 0,8 м, расстояние между антеннами ПРД и ПРМ R_m = 150 м, высота размещения антенн и высота Н $h = y_0 = 1$ м, длина волны СВЧ-излучения ПРД λ = 0,016 м.



а) б)

Рисунок 7 – Результат интерференции ЭМ-волн: а) $R_Н$ = 10 м; б) $R_Н$ = 140 м

Из рис. 7 видно, что чем ближе Н находится к ПРМ, тем заметнее проявляется эффект ***тени*** от Н. В работе определена зависимость **ширины «тени»** по направлению ПРМ от расстояния $R_{\text{Н}}$ до Н. Ширина «тени» определяется по выражению (4), а также исходя из пространственного распределения $\left|\dot{E}(x_R)\right|$ по максимальным значениям интерференционного множителя (1) вблизи главного максимума, использовав значения интерференционного множителя при $\Delta\varphi = \pm\pi$.

Таким образом, зарегистрировав пространственное распределение **модуля** комплексной амплитуды ЭМ-волны как результат дифракции на Н, можно:

– определить факт появления Н в ОЗ с помощью порогового обнаружения;

– измерив ширину главного лепестка «тени» определить дальность до Н;

– измерив изменение координаты главного минимума во времени можно определить скорость движения Н.

В работе оценены **пространственные параметры устройства регистрации ЭМ-волны** с учетом параметров результата дифракции ЭМ-волн на Н. При большом расстоянии от Н до ПРМ дифракционная картина (рис. 8 а) представляет собой осцилляции с изменяющейся по линейному закону частотой и растянутые по оси $0x_R$ на расстоянии порядка ±10 м. Для регистрации пространственного распределения амплитуды необходимо взять интервал дискретизации по оси наблюдения, вытекающий из теоремы Котельникова и определяемый максимальной пространственной частотой $\Delta x_R \le 1/2F_{x,\max}$, или минимальным пространственным периодом: $\Delta x_R \ge T_{x,\min}/2$. Используем параметры, которые соответствуют рис. 8 а): λ = 0,016 м, R_m=150 м, $R_{\text{Н}}$=10 м. Для фазового сдвига $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}\cdot\frac{x_R^2}{2(R_0 - R_{\text{Н}})}$, который является аргументом косинуса в интерференционном множителе (1) и который является периодической функцией, максимумы будут удовлетворять уравнению

$$\Delta\varphi(x_R, x_{\text{Н}} = 0) = 2\pi n = \frac{2\pi}{\lambda}\cdot\frac{x_R^2}{2(R_m - R_{\text{Н}})}, \tag{11}$$

где n = 0, 1, 2 … – целые числа. Определив значения n из уравнения (11), был определен минимальный пространственный сдвиг максимума косинусоидального интерференционного множителя, который соответствует минимальному пространственному периоду:

$$T_{x,\min} = x_{R,2} - x_{R,1} = \sqrt{2\lambda(R_m - R_{\text{Н}})}\cdot(\sqrt{n_2} - \sqrt{n_1}) = 0{,}22\text{м}. \tag{12}$$

Тогда число ПРМ для регистрации амплитуды по направлению $0x_R$:

$$N_{\text{ПРМ,min}} = 2X_{\text{ПРМ}} / T_{x,\min} = 2 \cdot 20\text{м} / 0{,}22\text{м} \approx 182, \qquad (13)$$

то есть для точной регистрации пространственного распределения амплитуды ЭМ-волны необходимо на длине $X_{\text{ПРМ}}$ = 20 м разместить 182 точечных СВЧ-приемника с шагом 0,22 м. Для максимального расстояния $R_{\text{Н}}$ = 140 м (рис. 8 б) уменьшается шаг дискретизации размещения ПРМ, что приводит к существенному увеличению их количества, которое равно $N_{\text{ПРМ,max}} \approx 2500$. Этот результат и результат (13) с конструктивной точки зрения представляется нереальным для реализации, особенно для мобильных охранных систем. Для регистрации результата дифракции ЭМ-волн на нарушителе следует использовать **точечный приемник**, а пространственное распределение амплитуды ЭМ-волны будет учитываться за счет **движения** Н в направлении, перпендикулярном оси ОЗ.

Восстановление одномерной функции пропускания объекта

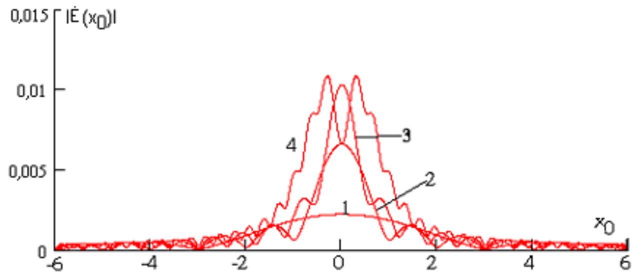
Для восстановления функции пропускания объекта дифракции с целью получения изображения объекта воспользуемся интегральным преобразованием Кирхгофа (6), в котором заменим $\beta_{\text{пр}}(x)$ на $\dot{E}(P,x_0)$, а показатель степени в экспоненте **на комплексно сопряженный:**

$$\beta_{\text{пр}}(x) = -\frac{jA}{2\lambda}\int_{-\infty}^{\infty}\dot{E}(P,x_0)\frac{\exp[-jk(r(x_0)+s(x_0))]}{r(x_0)s(x_0)}[\cos(\vec{n},\vec{r})-\cos(\vec{n},\vec{s})]dx_0\,. \qquad (14)$$

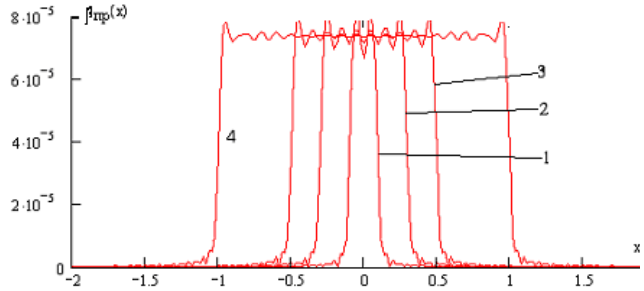
Полученное преобразование будем называть **обратным преобразованием Кирхгофа**. В работе получено выражение для восстановления функции пропускания одномерного объекта:

$$\beta_{\text{пр}}(x) = \frac{1}{2\lambda}\int_{-\infty}^{\infty}\dot{E}(P,x_0)\frac{\exp[-jk(r(x_0)+s(x_0))]}{r(x_0)s(x_0)}\left[\frac{R_{\text{Н}}}{r(x_0)}-\frac{R_{\text{Н}}-R_m}{s(x_0)}\right]dx_0\,. \qquad (15)$$

На рис. 8 представлены результаты расчета в среде *Mathcad* значений $\dot{E}(P,x_0)$ для восстановления по ним вида функции $\beta_{\text{пр}}(x)$. При этом использовались параметры λ = 0,016 м, $y_0 = h$ = 1 м; $R_{\text{н}}$ = 75 м; R_{m} = 150 м, а также различные размеры объекта $2a$ = 0,2 м (1); $2a$ = 0,6 м (2); $2a$ =1,0 м (3); $2a$ =2 м (4).



а)



б)

Рисунок 8 – Результат дифракции на Н (а) и восстановленная функция пропускания Н (б)

Особенностью восстановленной функции пропускания Н является значительный динамический диапазон, который оценивается, отношением > 20. То есть использование обратного преобразования Кирхгофа (15) **улучшает отношение сигнал-шум** в несколько десятков раз по сравнению с простой регистрацией амплитуды принимаемой ЭМ-волны. Это связано с использованием интегрального преобразования, которое «собирает» энергию пространственно-распределенного сигнала и концентрирует ее в виде короткого отклика восстановленной функции пропускания.

Для выполнения преобразования (15) необходимо зарегистрировать комплексную амплитуду выходного напряжения ПРМ, которое может быть обеспечено **приемником с квадратурным детектором**, в котором действительная и мнимая часть комплексной амплитуды входного напряжения разделяются путем введения фазового сдвига на $\pi/2$, а несущее колебание с частотой устраняется путем фильтрации.

Восстановление двумерной функции пропускания нарушителя

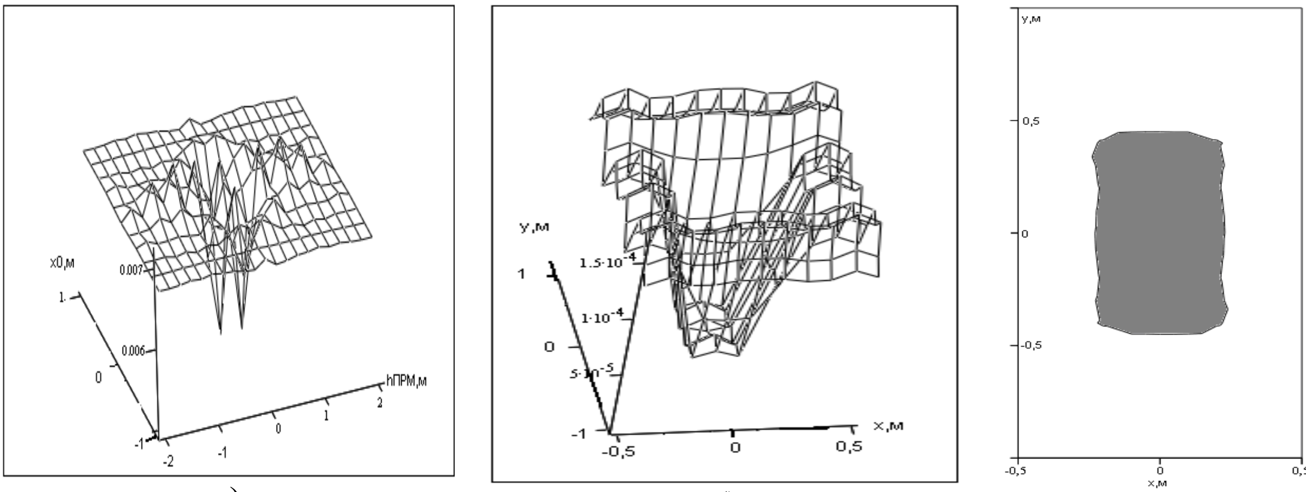
Восстановление вида двумерной функции пропускания Н даст значительно больше информации о типе Н и его геометрических размерах. Однако при определении зависимости функции пропускания и геометрических размеров Н по координате y (по вертикальным размерам Н) уже невозможно использовать его перемещение в охраняемой зоне РЛТСО, так как человек-нарушитель перемещается по поверхности земли. Для получения информации о размерах Н в вертикальной плоскости необходимо зарегистрировать пространственное распределение комплексной амплитуды ЭМ-волны в вертикальном направлении по оси $0y$, для чего необходимо использовать **линейку** точечных приемников в плоскости регистрации.

Получено выражение для двумерного преобразования, в котором по вертикали использована сумма, учитывающая эквидистантное размещение элементов $2N$ элементов линейки ПРМ. Кроме того, преобразование по горизонтали также взято дискретным при дискретных значениях x_{0m}:

$$\beta_{\text{пр}}(x,y)=\frac{1}{2\lambda}\sum_{m=0}^{2M}\sum_{n=0}^{2N}\dot{E}(x_{0m},h_{\text{ПРМ}}^{(n)})\times$$
$$\times\frac{\exp[-jk(\sqrt{(x+x_0)^2+(y-h_{\text{ПРД}})^2+R_{\text{Н}}{}^2}+\sqrt{(x+x_0)^2+(y-h_{\text{ПРМ}}^{(n)})^2+(R_m-R_{\text{Н}})^2})]}{\sqrt{(x+x_0)^2+(y-h_{\text{ПРД}})^2+R_{\text{Н}}{}^2}\sqrt{(x+x_0)^2+(y-h_{\text{ПРМ}}^{(n)})^2+(R_m-R_{\text{Н}})^2}}]\times, \quad (16)$$
$$\times[\frac{R_{\text{Н}}}{\sqrt{(x+x_0)^2+(y-h_{\text{ПРД}})^2+R_{\text{Н}}{}^2}}-\frac{R_{\text{Н}}-R_m}{\sqrt{(x+x_0)^2+(y-h_{\text{ПРМ}}^{(n)})^2+(R_m-R_{\text{Н}})^2}}]\Delta h_{\text{ПРМ}}\Delta x_0$$

где $\Delta h_{\text{ПРМ}}^{(n)}$ – расстояние между n и $(n+1)$-м ПРМ; для случая эквидистантного размещения ПРМ $\Delta h_{\text{ПРМ}}^{(n)}=\Delta h_{\text{ПРМ}}$ и $h_{\text{ПРМ}}^{(n)}=h_{N,\text{ПРМ}}+(n-N)\Delta h_{\text{ПРМ}}$; $x_{0m}=(m-M)\Delta x_0$, Δx_0 – шаг дискретизации x_0, $2M$ – максимальное значение индекса суммирования m, $\dot{E}(x_{0m},h_{\text{ПРМ}}^{(n)})$ – отсчет двумерной комплексной амплитуды поля с выхода n-го ПРМ при значении координаты x_0 центра Н, равной x_{0m}.

На рис. 9 а) представлен результат вычисления двумерной функции дифракции ЭМ-волны в плоскости ПРМ, на рис. 9 б) – результат восстановления двумерной функции пропускания, а на рис. 9 в) – линия уровня двумерной функции пропускания, показывающая сечение или теневой контур Н.



а) б) в)

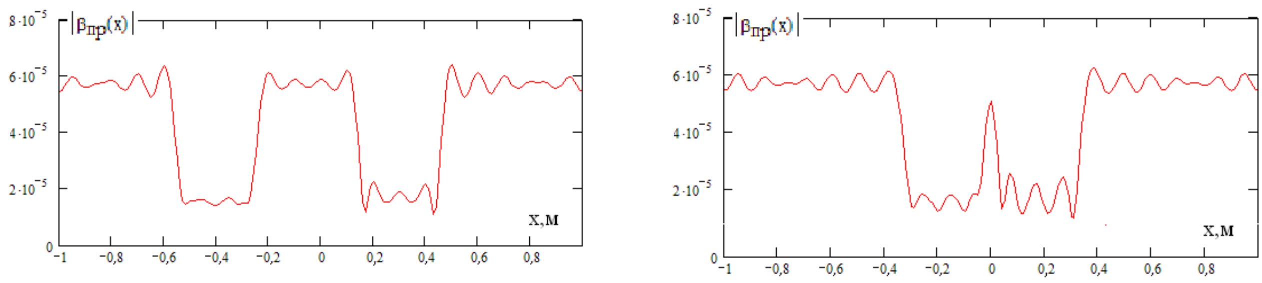
Рисунок 9 – Формирование двумерной функции пропускания нарушителя

Расчет проводился при следующих параметрах модели Н: a = 0,2 м, b = 0,4 м, с = 0,3 м, R_m = 150 м и $R_{\text{Н}}$ = 50 м, шаг дискретизации Δx_0 и $\Delta h_{\text{ПРМ}}$ равны 0,04 м. Анализ рис. 9 позволяет сделать вывод, что форма и размеры контура восстановленной двумерной функции пропускания $\beta_{\text{пр}}(x,y)$ хорошо повторяют форму и размеры эллиптического цилиндра, используемого в данном случае в качестве модели Н при проходе «в рост». Приведенный на рис. 9 в) контур является контуром теневого силуэта модели Н при освещении его плоской ЭМ-волной со стороны ПРД.

Разрешающая способность определения числа нарушителей

Важной особенностью разработанного метода формирования изображения нарушителя является различие отдельных Н в случае одновременного прохода двух или нескольких нарушителей с некоторым интервалом между ними по оси 0x.

На рис. 10 приведены результаты восстановления функции пропускания $\beta_{\text{пр}}(x)$ при различных значениях расстояния между двумя Н. Размер обеих Н по оси 0x равен 2a1 = 2a2 = 0,3 м.



а) б)

Рисунок 10 – Определение разрешающей способности по определению количества нарушителей

Расстояние между центрами нарушителей $x_0^1 - x_0^2$ равно 0,7 м для рис. 10 а) и 0,3 м – для рис. 10 б). Уверенное определение прохода двух нарушителей происходит до расстояния между ними, равного 0,4 м (рис. 10 б). Оценка разрешающей способ-

ности $\Delta x_{н}$ метода по определению количества нарушителей основывается на измерении относительного провала между откликами от двух нарушителей, который должен составлять 0,5 от $\left|\beta_{пр,max}(x)\right|$. Этот случай соответствует рис. 10 б), из которого следует, что $\Delta x_{н} = 0{,}1$м, то есть

$$\Delta x_{н} = \left|x_0^1 - x_0^2\right| - 2a\,,$$

где $2a$ – размер нарушителя.

Разработанные математические модели и алгоритмы могут быть реализованы в специализированных устройствах цифровой обработки информации на базе микроконтроллеров или программируемых логических интегральных схемах. Это дает возможность использовать разработанные методы в мобильных РЛТСО, повышая эксплуатационные характеристики и увеличивая эффективность их применения.

Выводы

На основе скалярной теории дифракции Кирхгофа получена математическая модель формирования дифракционной картины ЭМ-волны в плоскости приема для радиолучевых технических систем охраны. На базе этой модели разработаны алгоритмы формирования комплексной амплитуды ЭМ-волны в плоскости приема.

Разработан метод формирования радиоизображения нарушителя в виде теневого силуэта на основе интеграла Кирхгофа. Полученное преобразование названо обратным преобразованием Кирхгофа, связывающим функцию пропускания объекта с пространственным распределением комплексной амплитуды ЭМ-волны в плоскости приема.

Количественная оценка качества восстановления функции пропускания показывает существенное улучшение отношения сигнал/шум в несколько десятков раз, что позволяет существенно улучшить характеристики бинарного обнаружения для РЛТСО. Кроме того, применение обратного преобразования Кирхгофа в РЛТСО дает возможность формировать радиоизображение нарушителя с последующей его классификацией, что приводит к уменьшению вероятности ложной тревоги.

Разработанный метод восстановления функции пропускания объектов в охранной зоне РЛТСО обладает хорошей разрешающей способностью в направлении движения нарушителя, что позволяет определить число нарушителей.

Литература

1. Сальников И.И. Анализ пространственно-временных параметров удаленных объектов в информационных технических системах / Сальников И.И. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 252 с.
2. Юу Ф.Т.С. Введение в теорию дифракции, обработку информации и голографию / Юу Ф.Т.С. – М. : Сов. радио, 1979. – 304 с.

Literatura

1. Salnikov I.I. Analiz prostranstvenno-vremennyh parametrov udalennyh ob’ektov v informacyonnyh tehnicheskih sistemah / Salnikov I.I. – M. : FIZMATLIT, 2011. – 252 s.
2. Uu F.T.S Vvedenie v teoriu difrakcii, obrabotku informacii i golografiu / Uu F.T.S. – M. : Sov. radio, 1979. – 304 s.

RESUME

I.I. Salnikov

Forming of the Intruder's Image in Radio Beam Protection Systems

On the basis of the scalar diffraction theory of Kirchhoff, the mathematical model of the diffraction pattern of the EM wave in the detection of radio beam technical protection systems. Based on this model, the algorithms for forming of the complex amplitude of the EM wave in the detection are developed.

The method for forming the offender in a radio image of the shadow silhouette on the basis of the Kirchhoff integral is investigated. The resulting transformation is called the inverse Kirchhoff transformation connecting the transmission function of the object with a spatial distribution of the complex amplitude of the EM wave in the detection.

Quantitative evaluation of the quality of the restoration of the transmission function shows a significant improvement in signal / noise ratio of several tens of times, which can significantly improve the performance of binary detection for radio beam protection system. In addition, the application of the inverse Kirchhoff transformation in radio beam protection system allows creatinf radio image of the offender, followed by its classification, which reduces the probability of false alarm.

The developed method of recovery of the transmission function of objects in the buffer zone of radio beam protecting system has a good resolution in the direction of the offender, which allows to determine the number of offenders.

Статья поступила в редакцию 01.06.2012.